

放线菌代谢产物的研究进展：基于 Web of Science (WOS)和中国知网(CNKI)

孔璐琦^{1,2,3}, 王敬敬^{*1,2}, 胡琳珍³, 黄志勇^{*1,2}

1 中国科学院天津工业生物技术研究所 天津工业生物系统与过程重点实验室, 天津 300308

2 国家合成生物技术创新中心, 天津 300308

3 湖北大学生命科学学院, 湖北 武汉 430062

孔璐琦, 王敬敬, 胡琳珍, 黄志勇. 放线菌代谢产物的研究进展：基于 Web of Science (WOS)和中国知网(CNKI)[J]. 微生物学通报, 2023, 50(9): 4275-4302.

KONG Luqi, WANG Jingjing, HU Linzhen, HUANG Zhiyong. Advances in metabolites of actinobacteria: a study based on Web of Science (WOS) and China National Knowledge Infrastructure (CNKI)[J]. Microbiology China, 2023, 50(9): 4275-4302.

摘要:【背景】放线菌是一类极其重要的微生物, 代谢产物丰富, 在医药、生物技术、农业和酶工业等领域均有广泛应用。【目的】客观分析放线菌代谢产物的研究进展, 为该领域相关工作人员提供有效情报, 推动该领域高质量发展。【方法】对 Web of Science (WOS)和中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)数据库中放线菌代谢产物的发文数量、发文国家、发文机构、发文章期、发文出版社、发文作者、被引文章和研究方向进行统计分析, 利用 *H* 指数对相关影响力进行综合评价, 其研究热点、发展趋势通过 CiteSpace 和 VOSviewer 软件进行可视化分析。【结果】WOS 结果显示, 放线菌代谢产物研究领域全球影响力最大的国家是美国, 影响力最大的机构是美国加利福尼亚大学, 影响力最大的期刊是美国 *Applied and Environmental Microbiology*, 影响力最大的出版社是 Elsevier, 影响力最大的作者是来自英国约翰英纳斯研究中心微生物学部的 Mervyn J Bibb 教授。全球放线菌代谢产物领域的主要研究方向是微生物学, 研究热点是生物合成。研究趋势由 2000 年前对基因和抗生素相关的研究, 转变为 2000 年后对肠道微生物群和天然产物发现相关的研究。CNKI 结果显示, 放线菌代谢产物研究领域中国影响力最大的机构是西北农林科技大学, 影响力最大的期刊是微生物学通报, 影响力最大的作者是云南大学徐丽华教授。放线菌代谢产物领域

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFA0902200); 黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28030301); 天津市自然科学基金(20JCYBJC01220); 天津市合成生物技术创新能力提升行动(TSBICIP-IJCP-001); 科技部科技伙伴计划(KY202001017)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFA0902200), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA28030301), the Tianjin Natural Science Foundation (20JCYBJC01220), the Tianjin Synthetic Biotechnology Innovation Capacity Improvement Project (TSBICIP-IJCP-001), and the Science and Technology Partnership Program of Ministry of Science and Technology (KY202001017).

*Corresponding authors. E-mail: WANG Jingjing, wang_jj@tib.cas.cn; HUANG Zhiyong, huang_zy@tib.cas.cn

Received: 2023-03-17; Accepted: 2023-04-28; Published online: 2023-06-16

的主要研究方向是生物学, 研究热点是放线菌。研究趋势由 2000 年前对抗生素和生物合成相关的研究, 转变为 2000 年后对多样性和鉴定相关的研究。【结论】目前全球放线菌代谢产物研究在快速发展, 美国在该领域处于全球领先地位, 其发文数量、*H* 指数均排名世界首位, 发文机构、发期刊、发文出版社在世界范围内具有较大影响力。中国发文数量全球排名第二, *H* 指数全球排名第五, 相关发文机构、学者在国内外具有一定影响力。未来中国在放线菌代谢产物研究领域应加强高质量文章发表和期刊建设、出版社建设, 加强肠道微生物群和天然产物发现相关的研究, 以带动在该领域研究实力的整体提升。

关键词: 放线菌; 代谢产物; 文献计量分析; 发文量; 研究热点与趋势

Advances in metabolites of actinobacteria: a study based on Web of Science (WOS) and China National Knowledge Infrastructure (CNKI)

KONG Luqi^{1,2,3}, WANG Jingjing^{*1,2}, HU Linzhen³, HUANG Zhiyong^{*1,2}

1 Tianjin Key Laboratory for Industrial Biological Systems and Bioprocessing Engineering, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China

2 National Center of Technology Innovation for Synthetic Biology, Tianjin 300308, China

3 School of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China

Abstract: [Background] Actinobacteria are a class of microorganisms capable of producing rich metabolites, which are widely used in medicine, biotechnology, agriculture, and enzyme industry. [Objective] To review the research progress in the metabolites of actinobacteria and provide effective information for the high-quality development of this field. [Methods] Statistical analyses were conducted on the number, countries, institutions, journals, publishers, and authors of publications, cited articles, and research directions of the metabolites of actinobacteria. The relevant articles were retrieved from the Web of Science (WOS) and China National Knowledge Infrastructure (CNKI). The *H*-index was calculated to comprehensively evaluate the impact. The research hotspots and development trends were visualized in CiteSpace and VOSviewer. [Results] The analysis based on WOS showed that the United States, the University of California, *Applied and Environmental Microbiology*, and Elsevier were the country, institution, journal, and publisher, respectively, with the highest impact in this field. Professor Mervyn J Bibb in the microbiology department of the John Innes Centre in the UK was the author with highest impact. The main research direction in the metabolites of actinobacteria worldwide was Microbiology, and the research focused on the biosynthesis. The research trend evolved from the genes and antibiotics before 2000 to gut microbiota and natural products after 2000. The analysis based on CNKI showed that Northwest A&F University, *Microbiology China*, and Professor Lihua Xu at Yunnan University were the institution, journal, and author, respectively, with the highest impact in this field in China. The main research direction was Biology, and the research focused on actinomycetes. The research trend in this

field in China shifted from antibiotics and biosynthesis before 2000 to diversity and identification after 2000. **[Conclusion]** The research on the metabolites of actinobacteria is flourishing worldwide. The United States was a global leader in this field, ranking first in the world in terms of the number of publications and the *H*-index, with strongly influential institutions, journals, and publishers. China ranked second in terms of the number of publications and fifth in terms of the *H*-index, and the publishing institutions and scholars had influences at home and abroad. In the future, China should strengthen the publishing of high-quality articles and the building of journals and publishers in the research on the metabolites of actinobacteria and double the efforts to study gut microbiota and discover natural products, so as to build up the strength in this research field.

Keywords: actinobacteria; metabolites; bibliometric analysis; number of publications; research hotspots and trends

放线菌 (actinobacteria) 也曾被称之为“actinomycetes”, 是一类菌落呈放线状的革兰氏阳性细菌^[1-2]。1942年, Waksman 及其同事首次从放线菌门 (*Actinobacteria*) 的链霉菌中发现了链霉素 (streptomycin), 从此打开了放线菌广泛研究和应用的大门^[1]。近 80 年的放线菌研究, 首先已经建立了完善的分类系统, 放线菌门 (*Actinobacteria*) 包含 46 个目 79 个科 425 个属^[2]。其次, 在放线菌中发现了大量抗生素, 包括抗菌化合物 (antibacterial compounds) (如红霉素、四环素和万古霉素等)、抗癌化合物 (anticancer compounds) (如博来霉素、放线菌素 D 和丝裂霉素等)、免疫抑制化合物 (immunosuppressive compounds) (如雷帕霉素、他克莫司等)、抗寄生虫/杀虫化合物 (antiparasitic/insecticidal compounds) (如阿维菌素、杀螨菌素等)、除草化合物 (herbicidal compounds) (如比亚拉普斯、草铵膦等)^[3-4]。目前临床上作为医药使用的抗生素, 三分之二来源于放线菌, 拯救了无数人的生命^[5]。除用于医药, 这些抗生素也广泛应用于养殖业、种植业等领域。放线菌来源的抗生素已占抗生素市场的 80%^[3]。此外, 在放线菌中还发现了大量具有其他功能的代谢产物, 如用于食品、洗涤和造纸等领域的酶 (如淀粉酶、蛋白酶、几

丁质酶和纤维素酶等), 用于纺织、医药和化妆品等领域的表面活性剂 (如糖脂、糖基化肽脂和多糖等), 用于养殖业、农业等领域的生物修复剂 (如蛋白质衍生物、糖类衍生物和脂肪衍生物等) 等^[6]。

放线菌广泛分布于各种自然生态系统中, 已从土壤、海洋、淡水和植物等环境中分离出大量生产天然产物的放线菌物种。放线菌中的链霉菌属 (*Streptomyces*) 是生产天然产物, 尤其是抗生素最多的物种。已发现的 20 000 多个放线菌来源的天然产物中 70%–80% 均由链霉菌生产^[7]。链霉菌生产的抗生素包括生物碱类、类萜、肽、糖苷和聚酮类等^[7-8], 生产的酶包括漆酶、纤维素酶、蛋白酶、木聚糖酶和碱性蛋白酶等^[9-10]。放线菌中的诺卡氏菌属 (*Nocardia*) 在次级代谢过程中可以产生多种具有抗菌、抗肿瘤、抗氧化和蛋白抑制等生物活性的肽、生物碱、内酯、醌、萜和甾体^[11]。糖丝菌属 (*Saccharothrix*) 能够代谢产生已知抗生素的衍生物或新骨架, 如二硫吡咯酮类、内酰胺类、萜环类和氯霉素等新抗生素, 在抗病毒、抗菌和抗肿瘤等方面具有巨大的医药价值^[12]。小单孢菌属 (*Micromonospora*) 产生的化合物结构类型多样, 生物活性各异, 主要为抗生素和一些

人体酶, 其中最受重视的抗生素是庆大霉素, 最主要的特征是产生氨基糖苷类和大环内酯类抗生素^[13]。此外, 放线菌中代谢产物较丰富的属还有主产物为万古霉素(糖肽类抗生素)的拟无枝酸菌属(*Amycolatopsis*)^[14]、主产物为谷氨酰胺转移酶(单体蛋白质酶)的链轮丝菌属(*Streptovercillium*)^[15]、主产物为红霉素(大环内酯抗生素)的糖多孢菌属(*Saccharopolyspora*)^[16]、主产物为脲酶的指孢囊菌属(*Dactylosporangium*)^[17]、主产物为糖尿病用药阿卡波糖(低聚糖)的游动放线菌属(*Actinoplanes*)^[18]和主产物为兽用抗球虫抗生素-马拉霉素(聚醚类)的马杜拉放线菌属(*Actinomadura*)^[19](表 1), 由表 1 可以看出, 放线菌代谢产物种类丰富, 应用广泛。

随着在各种极端环境中放线菌新物种的发现, 以及高通量测序、高分辨率质谱和生物信

息等技术的发展, 放线菌中发现的新型天然产物数量仍在逐步增长^[3,20]。这些新化合物不仅对于新型药物的研发具有重要价值, 而且在应对全球细菌耐药方面具有重要意义。

一些科学家已经对放线菌及其代谢产物领域进行了很好的梳理, 如李文均等^[1]详细介绍了中国放线菌系统学研究历史、现状及未来发展趋势。尚坤等^[7]详细介绍了放线菌天然产物的类别。杨阳等^[21]利用 CiteSpace 软件对 Web of Science 数据库中收录的 2001–2021 年间放线菌及其代谢产物的研究现状和发展趋势进行了分析。这些研究为放线菌代谢产物领域相关研究和工作人员提供了有效情报, 推动了该领域的快速发展。然而目前尚缺少对放线菌代谢产物领域研究的全面分析和梳理。全面分析放线菌代谢产物领域的研究, 不仅可以明晰该领域的

表 1 放线菌代谢产物较丰富的 10 个放线菌属及其主要产物类型

Table 1 The top 10 actinobacterial genus with the most abundant metabolites and their types

科	属	代谢主产物	主产物类型	应用
Family	Genus	Main metabolite	Metabolites type	Application
链霉菌科 <i>Streptomycetaceae</i>	链霉菌属 <i>Streptomyces</i>	链霉素	氨基糖苷类	抗菌
	链轮丝菌属 <i>Streptovercillium</i>	谷氨酰胺酶	单体蛋白质	催化氨基酸
		MTGase	Monomeric protein	Catalytic amino acids
小单孢菌科 <i>Micromonosporaceae</i>	游动放线菌属 <i>Actinoplanes</i>	阿卡波糖	低聚糖	抗糖尿病
	指孢囊菌属 <i>Dactylosporangium</i>	脲酶	蛋白质	转化尿素
		Urease	Protein	Transform urea
	小单孢菌属 <i>Micromonospora</i>	庆大霉素	氨基糖苷类	抗菌
伪诺卡氏科 <i>Pseudonocardiaceae</i>	拟无枝酸菌属 <i>Amycolatopsis</i>	万古霉素	糖肽类	抗菌
		Vancomycin	Glycopeptide	Antibacterial
	糖丝菌属 <i>Saccharothrix</i>	纤维素酶	多组分酶系	降解纤维素
		Cellulase	Multicomponent enzyme lines	Degradation of cellulose
	糖多孢菌属 <i>Saccharopolyspora</i>	红霉素	大环内酯	抗菌
诺卡氏菌科 <i>Nocardiaceae</i>	诺卡氏菌属 <i>Nocardia</i>	诺卡巴汀 NA (2)	肽类	抗菌
		Nocobactin NA (2)	Pseudopeptide	Antibacterial
高温单孢菌科 <i>Thermomonosporaceae</i>	马杜拉放线菌属 <i>Actinomadura</i>	马杜霉素	聚醚类	兽用抗球虫
		Maduramicin	Polyether	Veterinary anti coccidiosis

发展现状和趋势,而且可以明确中国在该领域的地位与不足,为中国放线菌代谢产物的高质量发展指明方向。因此,本文综合利用 Web of Science 数据库和中国知网数据库,对截至 2022 年全球、中国范围内放线菌代谢产物的发文数量、发文国家、发文机构、发文期刊、发文出版社、发文作者、被引文章和研究方向进行统计并利用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件对研究热点和发展趋势进行可视化分析^[22],以期为该领域相关工作人员提供有效情报,推动该领域的高质量发展。

1 数据来源

本数据基于 Web of Science 数据库,以下简称 WOS,采用其中的核心合集数据库(Web of Science Core Collection)中的科学引文索引 Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)数据库,参考放线菌代谢产物较多的 10 个菌属^[21],以“TS=[(Actino* AND metaboli*) OR (Actino* AND product*) OR (*Streptomyces* AND metaboli*) OR (*Streptomyces* AND product*) OR (*Micromonospora* AND metaboli*) OR (*Micromonospora* AND product*) OR (*Amycolatopsis* AND metaboli*) OR (*Amycolatopsis* AND product*) OR (*Nocardia* AND metaboli*) OR (*Nocardia* AND product*) OR (*Streptoverticillium* AND metaboli*) OR (*Streptoverticillium* AND product*) OR (*Saccharopolyspora* AND metaboli*) OR (*Saccharopolyspora* AND product*) OR (*Dactylosporangium* AND metaboli*) OR (*Dactylosporangium* AND product*) OR (*Saccharothrix* AND metaboli*) OR (*Saccharothrix* AND product*)]”为主题 (*Actinoplanes*、*Actinomadura* 由于包含在 Actino*中,因此不进行统计)进行检索。截至 2022 年 12 月 31 日,检索出相关文献 31 791 篇,其中论文 28 648 篇,占比 90.11%;综述论文 2 370 篇,占比 7.45%;

其他 773 篇,占比 2.43%。文章数据库的最后更新时间为 2023 年 1 月 3 日 12 时 23 分。

同时,基于中国知网数据库,以下简称 CNKI,利用高级检索方式,以“(放线菌天然产物) OR (放线菌产物) OR (放线菌代谢物) OR (放线菌提取物) OR (放线菌次生代谢产物)”为主题进行检索,时间截至 2022 年 12 月 31 日,检索出相关中文文献 4 035 篇,其中包括学术期刊 1 575 篇,占比 39.03%;学位论文 2 293 篇,占比 56.83%;其他类型 167 篇,占比 4.14%。文章数据库的最后更新时间为 2023 年 1 月 3 日 12 时 23 分。

2 分析方法

文献计量学是由英国情报学家 Alan Pritchard 首次提出的一门以文献体系和文献计量特征为研究对象,通过数学、统计等计量方法与可视化手段,分析和预测该领域研究现状与发展趋势的图书情报学分支学科^[23]。文献计量分析法是以文献计量学为基础的一种定量分析方法,是以科技文献的各种外部特征作为研究对象,采用数学与统计学的方法来描述、评价和预测科学技术与发展趋势的一种方法^[24],主要特点输出必是量化的信息内容^[25],该分析手段可用于评价某一领域的科学活动^[26]。本文借助 VOSviewer 和 CiteSpace 文献计量分析软件对放线菌代谢产物领域研究热点与研究趋势进行分析。其中研究热点主要通过 VOSviewer 软件分析,研究趋势主要通过 CiteSpace 软件分析。VOSviewer 是荷兰莱顿大学科技研究中心 Nees Jan van Eck 和 Ludo Waltman 开发的一款软件,数据通过该软件的分析,可以得到文献的聚类视图、叠加视图和密度视图,以评估该领域的研究方向和研究热点^[27]。CiteSpace 软件是用于识别并显示研究动态、预测研究趋势的

一种工具,生成的各类知识图谱能对学科的发展进程与结构有一定的显示作用^[28],在 CiteSpace 中,可以通过词频分析、词汇突现性等功能判断一定时间段内的研究主题,并根据时序变化分析研究主题演变^[29]。

对发文数量、发文国家、发文机构、发期刊、发文出版社、发文作者、被引文章和研究方向等方面进行分析(由于 CNKI 无发文出版社结果,所以该数据暂未统计),利用 *H* 指数可对文献的影响力进行综合评价。*H* 指数(*H*-index)是美国加州大学圣地亚哥分校物理学家赫希(Jorge E. Hirsch)教授于 2015 年提出的一种基于文献被引情况定量评价学者学术影响力的方法,该指数结合了作者的发文量和文献被引情况考察作者的学术影响力,兼顾了文献的数量和质量,被认为是一个较合理有效的评价指标^[30]。WOS 统计的是英文 SCI 文章,反映的是国际情况,而 CNKI 统计的是中文文献,包括文章和毕业论文,反映的是国内情况。2 个数据库无重合文献。利用 2 个数据库综合分析,可以相互补充,对全球放线菌代谢产物研究领域进行全面的了解。

3 分析结果

3.1 发文数量及其变化趋势

WOS 结果显示,截至 2022 年放线菌代谢产物领域共发文 31 791 篇。第 1 篇相关文献发表于 1918 年^[31],文章主要介绍了一种利用代谢产物(蛋白水解酶)鉴别致病放线菌的方法;1918–1945 年间共发文 14 篇;1946–1990 年发文量逐渐增长,共发表相关论文 1 314 篇,年均发文量 30 篇;1991 年,随着美国在该领域大规模发表相关论文,放线菌代谢产物相关领域的发文量实现飞跃性增长,年发文量突破 100 篇;1991–2011 年间共发文 13 692 篇,年均

发文量 137 篇,发文速率呈中高速增长;2012 年发文量突破 1 000 篇且呈逐年上升趋势;近 10 年间(2012–2022 年)总发文量达到 16 874 篇,年均发文量 1 406 篇,发文速率保持高速增长,进入放线菌代谢产物研究的高热时代。

CNKI 结果显示,截至 2022 年放线菌代谢产物领域共得到 4 035 篇相关文献。第 1 篇相关文献发表于 1959 年,文章主要介绍了一种提升放线菌产抗菌素的培养方法^[32];1959–1998 年间 CNKI 共发表相关文献 90 篇,年均发文量 2 篇,发文量少,呈低速增长;1999–2005 年间共发文 225 篇次,年均发文量 32 篇,呈中速增长;2006 年发文量突破 100 篇;近 17 年间(2006–2022 年)总发文量 3 707 篇,年均发文量 218 篇,发文量保持稳定水平(图 1)。

3.2 发文国家分析

WOS 分析结果显示,放线菌代谢产物领域的发文量排名前 10 的国家分别是美国、中国、日本、德国、英国、印度、韩国、加拿大、西班牙和法国。这 10 个国家总发文量为 27 728 篇,占总发文量的 87.22%。*H* 指数排名显示美国是放线菌代谢产物领域影响力最高的国家,*H* 指数为 217,远高于排名第二的英国(*H* 指数为 138)和排名第三的德国(*H* 指数为 134),这说明在该研究领域美国处于全球绝对领先的地位。中国(*H* 指数为 107)排名第五(表 2)。

美国在放线菌代谢产物领域的研究始于 20 世纪 70 年代,90 年代实现飞跃,21 世纪以前美国在该领域发文量大,占主导地位;中国在该领域的研究始于 20 世纪 50 年代,90 年代开始迅速发展,2013 年中国超越美国成为该领域年发文量第一的国家(图 2)。

3.3 发文机构分析

WOS 结果显示,放线菌代谢产物相关发文量全球排名前 10 的机构共发文 5 547 篇,占总

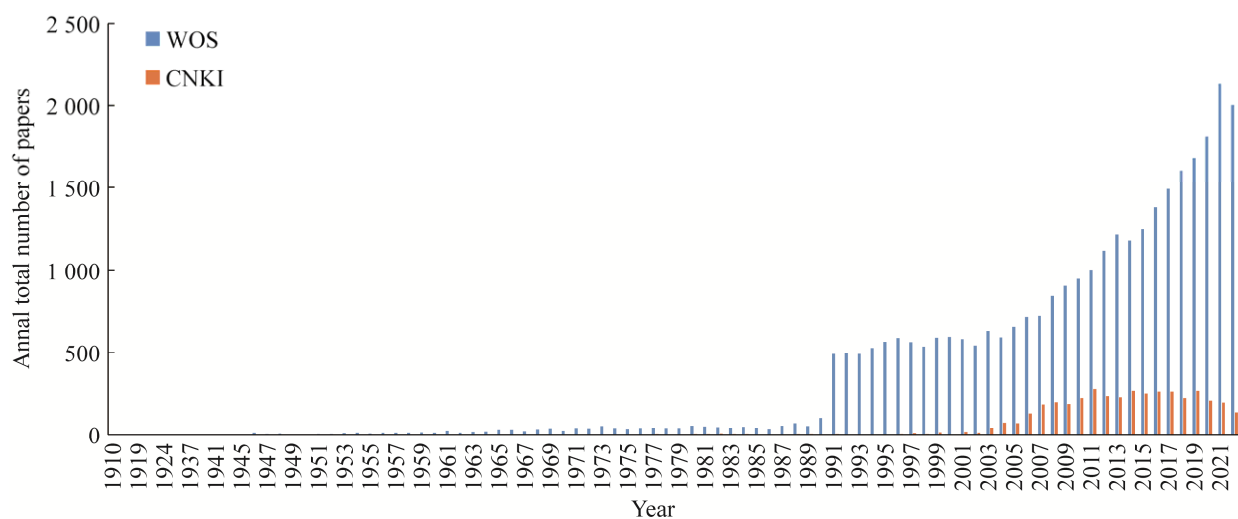


图 1 WOS 和 CNKI 中放线菌代谢产物年发文量

Figure 1 WOS and CNKI annual publication volume in metabolites of actinobacteria.

表 2 WOS 中放线菌代谢产物发文量前 10 的国家

Table 2 Top 10 countries of publications on metabolites of actinobacteria in WOS

排名	国家	发文量(篇)	发文百分比	总被引频次	篇平均被引频次	H 指数	H 指数排名
Rank	Country	Number of papers	Percentage (%)	Total citations	Average citation of per paper	H-index	Rank of H-index
1	美国 USA	7 036	22.13	342 121	48.62	217	1
2	中国 China	5 916	18.61	107 547	18.18	107	5
3	日本 Japan	3 243	10.20	99 436	30.66	117	4
4	德国 Germany	2 846	8.95	113 940	40.04	134	3
5	英国 England	1 873	5.89	97 928	52.28	138	2
6	印度 India	1 853	5.83	43 370	23.41	87	8
7	韩国 Korea	1 462	4.60	33 871	23.17	71	10
8	加拿大 Canada	1 311	4.12	49 755	37.95	97	6
9	西班牙 Spain	1 165	3.66	42 600	36.57	94	7
10	法国 France	1 023	3.22	36 486	35.67	83	9

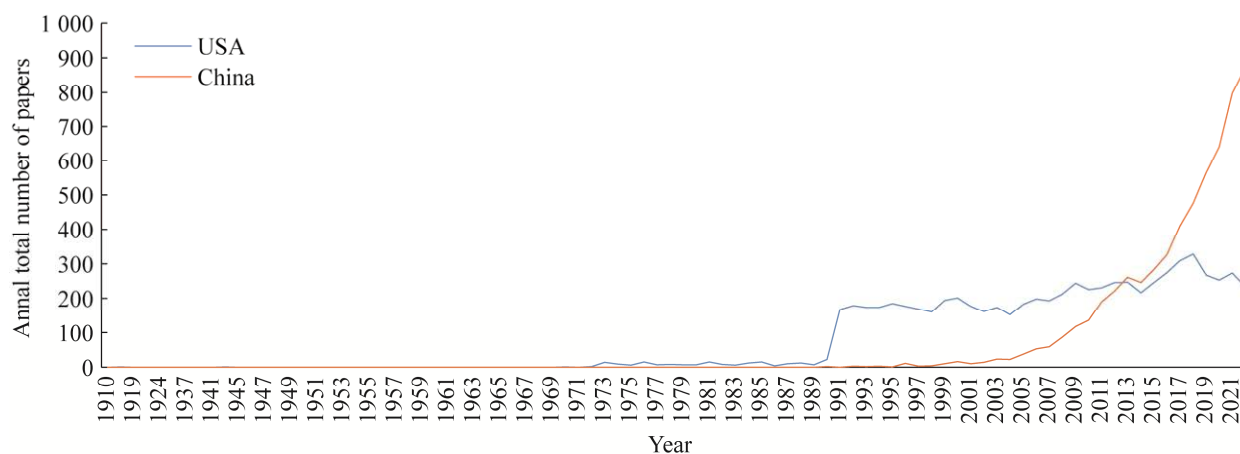


图2 WOS中美国和中国放线菌代谢产物研究领域发文量变化图

Figure 2 Change chart of articles in USA and China in the field of metabolites of actinobacteria in WOS.

发文量的 17.45%。中国科学院是全球发文量最多的机构,共发文 1 109 篇, H 指数 72,排名第四。 H 指数排名第一的是加利福尼亚大学, H 指数 103,远高于排名第二的英国国家科研与创新署(H 指数 88),这说明该机构在全球放线菌代谢产物领域的研究具有较高的国际影响力(表 3)。

WOS 中中国排名前 10 的发文机构共发文 3 266 篇,占统计范围内中国发文量的 55.21%。中国科学院是中国在放线菌代谢产物研究领域影响力最大的机构, H 指数 72,排名第一,发文量 1 240 篇,排名第一。中国科学院是一个拥有 11 个分院、100 多家科研院所、3 所大学的科研机构。中国科学院微生物研究所(发文量 212 篇, H 指数 40)是中国科学院众多科研机构中在放线菌代谢产物研究领域影响力最大的机构。排名第二的是上海交通大学(发文量 340 篇, H 指数 41)。这说明中国科学院和上海交通大学是我国在该领域具有较高国际影响力的机构(表 4);CNKI 数据显示,中国排名前 10 的发文机构共发文 1 052 篇,占统计范围内中国发文量的 26.08%。西北农林科技大学在放线菌代谢

产物领域发文量(271 篇)、 H 指数(25)均排名第一,云南大学的排名紧随其后,发文量 125, H 指数 21,这说明西北农林科技大学和云南大学是中国在该领域具有较高国内影响力的机构(表 4)。

3.4 发文期刊分析

WOS 结果显示,放线菌代谢产物发文量排名前 10 的期刊共发文 5 401 篇,占总发文量的 16.99%,分别来自 5 个国家。排名前 10 的期刊有 5 个属于美国,1 个属于日本,1 个属于德国,1 个属于瑞士,2 个属于英国。发文量最多的是日本的 *Journal of Antibiotics* (抗生素杂志)(发文 908 篇),远高于排名第二的德国的 *Applied Microbiology and Biotechnology* (应用微生物学和生物技术)(发文 781 篇)。 H 指数排名第一的是美国的 *Applied and Environmental Microbiology* (应用与环境微生物学)(H 指数 86)。美国的 *Journal of Bacteriology* (细菌学杂志)(H 指数 83)和 *Journal of Biological Chemistry* (生物化学杂志)(H 指数 82)紧随其后,说明这 3 个期刊在该领域具有较高的影响力(表 5)。相关性分析显示

表 3 WOS 中放线菌代谢产物发文量前 10 的机构

Table 3 Top 10 institutions for publications of metabolites of actinobacteria in WOS

排名 Rank	机构 Institution	国家 Country	发文量(篇) Number of papers	发文百分比 Percentage (%)	总被引频次 Total citations	篇平均被引频次 Average citation of per paper	H 指数 H-index	H 指数 排名 Rank of H-index
1	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	中国 China	1 240	3.90	20 070	24.25	72	3
2	加利福尼亚大学 University Of California System	美国 USA	776	2.44	41 044	52.89	103	1
3	国家科学研究中心 Centre National De La Recherche Scientifique	法国 France	535	1.68	17 652	32.99	61	5
4	埃及知识库 Egyptian Knowledge Bank Ekb	埃及 Egypt	485	1.53	9 452	19.49	46	9
5	法国研究型大学 Udice French Research Universities	法国 France	449	1.41	16 796	37.41	60	6
6	东京大学 University of Tokyo	日本 Japan	444	1.40	22 791	51.33	70	4
7	亥姆霍兹联合会 Helmholtz Association of German Research Centres	德国 Germany	437	1.37	13 535	30.97	56	8
8	艾伯哈特-卡尔斯-图宾根大学 Eberhard-Karls Universitaet of Tübingen	德国 Germany	411	1.29	14 392	35.02	60	6
9	英国国家科研与创新署 UK Research and Innovation	英国 England	390	1.23	32 834	84.19	88	2
10	上海交通大学 Shanghai Jiao Tong University	中国 China	380	1.20	6 927	18.23	41	10

期刊放线菌代谢产物方面的发文量和影响力与期刊的影响因子和分区无显著相关性(图 3)。

CNKI 数据显示, 放线菌代谢产物发文量排名前 10 的期刊共发文 524 篇, 占总发文量的 12.99%, 其中发文量排名第一、H 指数排名第一的期刊均为《微生物学通报》(发文 103 篇、H 指数 23), 相较于国内其他相关发文期刊而言,《微生物学通报》是放线菌代谢产物研究领域具有较高国内影响力的期刊。紧随其后的是 H 指数排名第二的期刊是《微生物学报》(H 指数 19, 发文量 66 篇), 表明《微生物学报》在中国该研究领域也有一定的影响力(表 6)。

3.5 发文出版社分析

WOS 结果显示, 放线菌代谢产物发文量前 10 的出版社共发文 22 612 篇, 占总发文量的 71.13%。这 10 个出版社来自 5 个国家。其中, 3 个出版社属于美国, 3 个属于英国, 2 个属于瑞士, 1 个属于德国, 1 个属于荷兰。其中发文量最多、H 指数排名最高的出版社是 Elsevier (爱思唯尔) (发文 6 016 篇, H 指数 156), 紧随其后的是 Springer Nature (施普林格·自然) (发文 5 180 篇, H 指数 142), 发文量和 H 指数均排名第二。说明这 2 个出版社在该领域具有较高的影响力(表 7)。

表 4 WOS 和 CNKI 中放线菌代谢产物中国发文量前 10 的机构

Table 4 Top 10 Chinese institutions for publications of metabolites of actinobacteria in WOS and CNKI

排名 Rank	WOS					CNKI				
	机构 Institution	发文量 (篇) Number of papers	发文 百分比 Percentage (%)	<i>H</i> 指数 <i>H</i> -index	<i>H</i> 指数 排名 Rank of <i>H</i> -index	机构 Institution	发文量 (篇) Number of papers	发文 百分比 Percentage (%)	<i>H</i> 指数 <i>H</i> -index	<i>H</i> 指数 排名 Rank of <i>H</i> -index
1	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	1 240	20.96	72	1	西北农林科技 大学 Northwest A&F University	271	6.72	25	1
2	上海交通大学 Shanghai Jiao Tong University	380	6.42	41	2	云南大学 Yunnan University	125	3.10	21	2
3	浙江大学 Zhejiang University	290	4.90	39	3	中国海洋大学 China Ocean University of China	120	2.98	14	6
4	华东理工大学 East China University of Science and Technology	249	4.21	32	4	东北农业大学 Northeast Agricultural University	106	2.63	16	3
5	农业农村部 Ministry of Agriculture and Rural Affairs	234	3.96	31	5	海南大学 Hainan University	83	2.06	12	7
6	中国农业科学院 Chinese Academy of Agricultural Sciences	215	3.63	31	5	南京农业大学 Nanjing Agricultural University	77	1.91	15	4
7	江南大学 Jiangnan University	175	2.96	29	8	四川农业大学 Sichuan Agricultural University	71	1.76	15	4
8	山东大学 Shandong University	174	2.94	27	9	山东大学 Shandong University	69	1.71	7	10
9	中国医学科学院 北京协和医学院 Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College	162	2.74	23	10	沈阳农业大学 Shenyang Agricultural University	65	1.61	12	7
10	中国农业大学 China Agricultural University	147	2.48	31	5	上海交通大学 Shanghai Jiao Tong University	65	1.61	12	7

表 5 WOS 中放线菌代谢产物发文量前 10 的期刊

Table 5 Top 10 journals for publications of metabolites of actinobacteria in WOS

排名 Rank	期刊 Journal	国家 Country	期刊影 响因子 Impact factor	JCR 分区 subregion	发文量(篇) Number of papers	发文百分比 Percentage (%)	总被引 频次 Total citations	篇平均被引 频次 Average citation of per paper	H 指数 H-index	H 指数 排名 Rank of H-index
1	抗生素杂志 <i>Journal of Antibiotics</i>	日本 Japan	3.424	Q2	908	2.86	21 854	24.07	61	5
2	应用微生物学 和生物技术 <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i>	德国 Germany	5.560	Q1	781	2.46	25 692	32.90	68	4
3	微生物学前沿 <i>Frontiers in Microbiology</i>	瑞士 Switzerland	6.064	Q1	733	2.31	14 384	19.62	55	8
4	细菌学杂志 <i>Journal of Bacteriology</i>	美国 USA	3.476	Q3	613	1.93	29 227	47.68	83	2
5	应用与环境 微生物学 <i>Applied and Environmental Microbiology</i>	美国 USA	5.005	Q2	584	1.84	28 410	48.65	86	1
6	美国科学公共 图书馆 <i>PLoS One</i>	美国 USA	3.752	Q2	411	1.29	13 699	33.33	57	6
7	天然产物期刊 <i>Journal of Natural Products</i>	美国 USA	4.803	Q1	398	1.25	16 188	40.67	53	7
8	生物化学杂志 <i>Journal of Biological Chemistry</i>	美国 USA	5.486	Q2	372	1.17	21 832	58.69	82	3
9	工业微生物 生物学杂志 <i>Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology</i>	英国 England	4.258	Q2	303	0.95	9 111	30.07	50	9
10	科学报道 <i>Scientific Reports</i>	英国 England	4.996	Q2	298	0.94	6 597	22.14	41	10

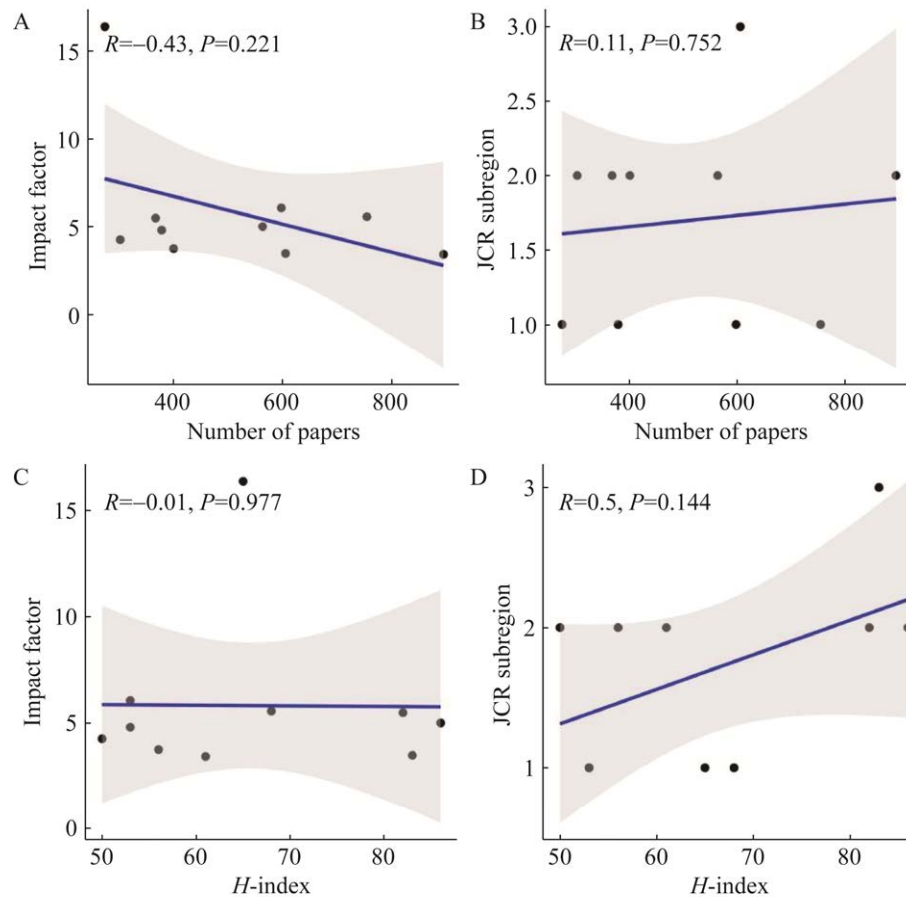


图 3 期刊发文量及 H 指数与期刊影响因子及 JCR 分区的相关性分析 A: 发文量与影响因子的相关性. B: 发文量与 JCR 分区的相关性. C: H 指数与影响因子的相关性. D: H 指数与 JCR 分区的相关性
Figure 3 Correlation analysis of journal publication volume and H -index and JCR partition. A: Correlation between journal publication volume and impact factor. B: Correlation between publication volume and JCR partition. C: Correlation between H -index and impact factor. D: Correlation between H -index and JCR partition.

表 6 CNKI 中放线菌代谢产物发文量前 10 的期刊

Table 6 Top 10 journals for publications of metabolites of actinobacteria in CNKI

排名	期刊	发文量(篇)	发文百分比	H 指数	H 指数排名
Rank	Journal	Number of papers	Percentage (%)	H -index	Rank of H -index
1	微生物学通报 <i>Microbiology China</i>	103	2.55	23	1
2	中国抗生素杂志 <i>Chinese Journal of Antibiotics</i>	94	2.33	15	4
3	微生物学报 <i>Acta Microbiologica Sinica</i>	66	1.64	19	2
4	中国海洋药物 <i>Chinese Journal of Marine Drugs</i>	53	1.31	16	3
5	微生物学杂志 <i>Journal of Microbiology</i>	41	1.02	10	5
6	国外医药(抗生素分册) <i>World Notes on Antibiotics</i>	40	1.00	9	7
7	安徽农业科学 <i>Journal of Anhui Agricultural Sciences</i>	36	0.89	10	5
8	天然产物研究与开发 <i>Natural Product Research and Development</i>	36	0.89	8	9
9	生物技术通报 <i>Biotechnology Bulletin</i>	30	0.74	9	7
10	江苏农业科学 <i>Jiangsu Agricultural Sciences</i>	25	0.62	7	10

表 7 WOS 中放线菌代谢产物发文量前 10 的出版社

Table 7 Top 10 publishing houses for publications of metabolites of actinobacteria in WOS

排名	出版社	国家	发文量(篇)	发文百分比	总被引频次	篇平均被引频次	H 指数	H 指数
Rank	Publishing house	Country	Number of papers	Percentage (%)	Total citations	Average citation of per paper	H-index	排名 Rank of H-index
1	爱思唯尔 Elsevier	荷兰 Holland	6 016	18.92	192 014	31.92	156	1
2	施普林格·自然 Springer Nature	德国 Germany	5 180	16.29	148 907	28.75	142	2
3	威利 Wiley	美国 USA	3 253	10.23	110 377	33.93	127	3
4	美国化学学会 American Chemical Society	美国 USA	1 919	6.04	71 236	37.12	102	5
5	美国微生物学学会 American Society for Microbiology	美国 USA	1 767	5.56	88 349	50.00	121	4
6	多学科数字出版学院 Multidisciplinary Digital Publishing Institute	瑞士 Switzerland	1 278	4.02	13 594	10.64	46	10
7	前沿媒体 Frontiers Media S.A	瑞士 Switzerland	1 061	3.34	17 903	16.87	59	8
8	泰勒-弗朗西斯出版集团 Taylor & Francis	英国 England	942	2.96	18 520	19.66	56	9
9	牛津大学出版社 Oxford University Press	英国 England	613	1.93	26 436	43.13	74	7
10	英国皇家化学学会 Royal Society Chemistry	英国 England	583	1.83	26 333	45.17	80	6

3.6 作者分析

WOS 结果显示,放线菌代谢产物发文量排名前 10 的作者共发文 1 110 篇, 占统计范围总发文量的 3.49%。发文量最多的是邓子新院士(发文 173 篇), 发文量排名第二的是 Jae Kyung Sohng 教授(发文 144 篇)。邓子新院士的主要研究方向为放线菌遗传学及抗生素生物合成的化学生物学等^[33-34]。H 指数排名第一的是来自英国约翰英纳斯研究中心微生物学部的 Mervyn J Bibb 教授(H 指数 53)。Mervyn J Bibb 教授团队主要通过基因工程技术激活沉默基因簇, 得到更为丰富的天然产物, 主要研究对象为链霉菌, 尤其在 *Streptomyces coelicolor* (天蓝色链霉菌) 研究领域开展了大量研究^[35-36] (表 8)。

CNKI 数据显示,放线菌代谢产物发文量排名前 10 的作者共发文 223 篇, 占统计范围总发文量的 5.53%。发文量最多的作者是来自中山大学生命科学学院生物防治国家重点实验室的李文均教授, 发文 31 篇, H 指数 14 排名第二。李文均教授团队主要工作是探寻在长期的自然选择下, 特殊生境来源的放线菌, 为应对周围环境的压力所产生特殊的结构、机能和遗传基因, 并在独特的代谢方式下产生的许多结构新颖、复杂且具有生物活性的化合物^[37-38]。H 指数排名第一的作者是云南大学生命科学学院的徐丽华教授(H 指数 18), 徐丽华教授一直从事放线菌分类学、生态学和资源学方面的工作, 同时也对放线菌天然产物进行研究^[39] (表 9)。

表 8 WOS 中放线菌代谢产物发文量前 10 的作者

Table 8 Top 10 authors for publications of metabolites of actinobacteria in WOS

排名 Rank	作者 Author	国家 Country	机构 Institution	发文量 (篇) Number of papers	发文 百分比 Percentage (%)	占该国发文 百分比 Percentage of the country (%)	总被引 频次 Total citations	篇平均被引 频次 Average citation of per paper	H 指数 H-index	H 指数 排名 Rank of H-index
1	DENG Zixin	中国 China	武汉大学 Wuhan University	173	0.54	2.92	3 918	22.65	34	6
2	SOHNG Jae Kyung	韩国 Korea	鲜文大学 Sunmoon University	144	0.45	9.85	2 495	17.33	27	9
3	OMURA Satoshi	日本 Japan	北里大学 Kitasato University	111	0.35	3.42	5 929	52.01	36	4
4	MENDEZ- FERNANDEZ Carmen	西班牙 Spain	奥维多大学 University of Oviedo	106	0.33	9.10	5 333	50.31	44	2
5	BIBB Mervyn J	英国 England	约翰英纳斯 研究中心 John Innes Centre	105	0.33	5.61	9 325	84.01	53	1
6	VAN WEZEL Gilles	荷兰 Netherlands	莱顿大学 Leiden University	102	0.32	17.99	5 004	49.06	38	3
7	LUZHETSKYY Andriy	德国 Germany	萨尔兰大学 Saarland University	97	0.31	3.41	1 975	19.55	26	10
8	JU Jianhua	中国 China	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	92	0.29	1.56	2 699	28.71	29	8
9	SHEN Ben	美国 USA	斯克里普斯 研究所 The Scripps Research Institute	90	0.28	1.28	3 221	34.27	32	7
10	WOHLLEBEN Wolfgang	德国 Germany	艾伯哈特- 卡尔斯-图 宾根大学 Eberhard- Karls Universitaet of Tubingen	90	0.28	3.16	3 358	36.11	35	5

表 9 CNKI 中放线菌代谢产物发文量前 10 的作者

Table 9 Top 10 authors for publications of metabolites of actinobacteria in CNKI

排名 Rank	作者 Author	机构 Institution	发文量(篇) Number of papers	发文百分比 Percentage (%)	H 指数 H-index	H 指数排名 Rank of H-index
1	李文均 LI Wenjun	中山大学 Sun Yat-sen University	31	0.71	14	2
2	鞠建华 JU Jianhua	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	26	0.68	8	8
3	朱伟明 ZHU Weiming	中国海洋大学 Ocean University of China	25	0.63	11	3
4	徐丽华 XU Lihua	云南大学 Yunnan University	23	0.60	18	1
5	洪葵 HONG Kui	武汉大学 Wuhan University	22	0.58	11	3
16	孙承航 SUN Chenghang	中国医学科学院北京协和医学院 Peking Union Medical College	22	0.58	11	3
7	崔承彬 CUI Chengbing	中国海洋大学 Ocean University of China	19	0.50	11	3
8	田新朋 TIAN Xingpeng	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	19	0.50	7	9
9	顾谦群 GU Qianqun	中国海洋大学 Ocean University of China	18	0.47	10	7
10	江红 JIANG Hong	福建省微生物研究所 Fujian Institute of Microbiology	18	0.42	6	10

3.7 被引文章分析

论文的被引频次是文献计量学中衡量学术论文影响力的一个重要指标, WOS 数据显示, 排名前 10 的高被引文章来自 3 个国家。其中, 5 篇来自美国, 2 篇来自英国, 1 篇来自德国, 1 篇来自法国, 一篇来自新西兰。从发表文章的类型来看, 研究论文 3 篇、综述文章 7 篇, 说明该领域在进行知识整理和总结的同时也注重相关科学试验工作。总被引频次排名第一的文章是 2007 年 Newman 等^[40]发表在 *Journal of Natural Products* (天然产物杂志) 上的 *Natural products as sources of new drugs over the last 25 years*, 这篇综述是对 1997 年和 2003 年发表在本杂志上的两篇先前综述的更新和扩展版本, 主要是总结整理了发现的天然产物来源的新药。总被引频次排名第二的文章是 2002 年

Bentley 等^[41]发表在 *Nature* (自然) 上的 *Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3(2)*, 这篇研究论文首次报道了链霉菌的全基因组序列, 分析了 20 多个次级代谢物的编码基因和调控基因, 为深入理解放线菌抗生素生物合成和调控及发现新的候选药物等奠定了重要基础(表 10)。

CNKI 数据显示, 中国国内被引频次最高的文章主要发表于 2000 年之后, 文章类型主要以综述为主。被引频次最高的文章是 2013 年赵成英等^[42]发表在《有机化学》的一篇综述“2010–2013 之海洋微生物新天然产物”, 文章主要介绍了 2010 年 1 月–2013 年 2 月已经报道的海洋细菌、放线菌和真菌来源的 895 个新天然产物的微生物来源、结构及其生物活性(表 11)。

表 10 WOS 中放线菌代谢产物被引频次排名前 10 的文章

Table 10 Top 10 cited articles for publications of metabolites of actinobacteria in WOS

排名 Rank	文章 Article	文章 类型 Article type	通讯作者 Corresponding author	国别 Country	发表 年份 Year	总被引 频次 Total citations	所属期刊 Journal	期刊影 响因子 Impact factor
1	过去 25 年天然产物来源的新药 Natural products as sources of new drugs over the last 25 years	综述 Review	NEWMAN David J	美国 USA	2007	3 133	<i>Journal of Natural products</i>	4.803
2	模式放线菌天蓝色链霉菌 A3(2)的全基 因序列 Complete genome sequence of the model actinomycete <i>Streptomyces coelicolor</i> A3(2)	研究 论文 Article	BENTLEY Stephen D, HOPWOOD David A	英国 England	2002	2 441	<i>Nature</i>	69.504
3	天然产物: 先导新药的持续来源 Natural products: a continuing source of novel drug leads	综述 Review	NEWMAN David J	美国 USA	2013	1 634	<i>Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects</i>	4.117
4	1981 年 1 月-2019 年 9 月近 40 年来作为 新药来源的天然产物 Natural Products as Sources of New Drugs over the Nearly Four Decades from 01/1981 to 09/2019	综述 Review	NEWMAN David J	美国 USA	2020	1 569	<i>Journal of Natural Products</i>	4.803
5	核糖体合成和翻译后修饰的肽天然产物: 通用命名法的概述和建议 Ribosomally synthesized and post- translationally modified peptide natural products: overview and recommendations for a universal nomenclature	综述 Review	van der DONK Wilfred A	瑞士 Netherland	2013	1 235	<i>Natural Products Reports</i>	15.111
6	PCR 靶向链霉菌基因替换鉴定了倍半萜 土臭素生物合成所需的蛋白质结构域 PCR-targeted <i>Streptomyces</i> gene replacement Identifies a protein domain needed for biosynthesis of the sesquiterpene soil odor geosmin	研究 论文 Article	GUST Bertolt	英国 England	2003	1 173	<i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i>	12.771
7	16S rRNA 基因特异性扩增和凝胶电泳 分离分析变性梯度放线菌群落 Analysis of actinomycete communities by specific amplification of genes encoding 16S rRNA and gel-electrophoretic separation in denaturing gradients	研究 论文 Article	HEUER Holger	德国 Germany	1997	1 106	<i>Applied and Environmental Microbiology</i>	5.005
8	抗生素发现平台 Platforms for antibiotic discovery	综述 Review	LEWIS Kim	美国 USA	2013	922	<i>Nature Reviews Drug Discovery</i>	112.288
9	放线菌的 CD 分类、生理学和天然产物 CD taxonomy, physiology, and natural products of actinobacteria	综述 Review	BARKA Essaid Ait	法国 France	2016	900	<i>Microbiology and Molecular Biology Reviews</i>	13.044
10	海洋天然产物 Marine natural products	综述 Review	BLUNT John W	新西兰 New Zealand	2013	598	<i>Natural Product Reports</i>	15.111

表 11 CNKI 中放线菌代谢产物被引频次排名前 10 的文章

Table 11 Top 10 cited articles for publications of metabolites of actinobacteria in CNKI

排名 Rank	文章 Article	文章类型 Article type	通讯作者 Corresponding author	发表年份 Year	总被引频次 Total citations	所属期刊 Journal
1	2010–2013 之海洋微生物新天然产物 New marine natural products of microbial origin from 2010 to 2013	综述 Review	朱伟明 ZHU Weiming	2013	151	有机化学 <i>Chinese Journal of Organic Chemistry</i>
2	植物内生放线菌研究 Research on endophytic actinomycetes in plants	综述 Review	周世宁 ZHOU Shining	2004	149	微生物学通报 <i>Microbiology China</i>
3	放线菌对 4 种病原真菌的拮抗作用初探 Preliminary study on the antagonistic effect of actinomycetes on four pathogenic fungi	综述 Review	方羽生 FANG Yusheng	2001	145	广东农业科学 <i>Guangdong Agricultural Sciences</i>
4	放线菌——微生物药物的重要资源 Actinomycetes—an important resource for microbial drugs	综述 Review	刘志恒 LIU Zhiheng	2001	137	微生物学通报 <i>Microbiology China</i>
5	海洋放线菌 11014 中抗肿瘤活性成分的研究I. 环二肽 Antitumor components from marine actinomycete 11014I-cyclic dipeptides	研究论文 Article	顾谦群, 朱伟明 GU Qianqun, ZHU Weiming	2005	130	中国抗生素杂志 <i>Chinese Journal of Antibiotics</i>
6	海洋放线菌研究进展 Research progress on marine actinobacteria	综述 Review	张偲, 李文均 ZHANG Si, LI Wenjun	2011	124	微生物学报 <i>Acta Microbiologica Sinica</i>
7	放线菌产生的生物活性物质 Bioactive substances produced by actinomycetes	综述 Review	徐丽华 XU Lihua	2007	101	微生物学通报 <i>Microbiology China</i>
8	海洋放线菌 S1001 中抗肿瘤活性成分的研究 The antitumor active component from marine derived actinomycete S1001	研究论文 Article	朱伟明, 顾谦群 ZHU Weiming, GU Qianqun	2006	95	中国抗生素杂志 <i>Chinese Journal of Antibiotics</i>
9	极端环境中的放线菌资源 Actinobacteria resources in extreme environments	综述 Review	姜成林 JIANG Chenglin	2003	95	微生物学通报 <i>Microbiology China</i>
10	6 株野生植物内生放线菌防病促生作用的初步研究 Inhibiting and promoting effect on plants of six strains endophytic actinomycetes isolated from wild plants	综述 Review	宗兆锋 ZONG Zhaofeng	2007	86	西北农林科技大学学报(自然科学版) <i>Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)</i>

3.8 研究方向分析

WOS 结果显示, 在 10 个研究方向中, 微生物学的发文量和 H 指数均排名第一(发文量 8 273 篇, H 指数 171)。生物技术应用微生物学(发文量 7 880 篇, H 指数 148)和生化分子生物学(发文量 5 571 篇, H 指数 164)分别是发文量

排名第二和 H 指数排名第二。这说明微生物学是全球放线菌代谢产物领域的主要研究方向, 生物技术应用微生物学和生化分子生物学是全球放线菌代谢产物领域的次要研究方向(表 12)。

CNKI 数据显示, 在 10 个研究方向中, 微生物学的发文量和 H 指数均排名第一(发文量

表 12 WOS 和 CNKI 中放线菌代谢产物发文量前 10 的研究方向

Table 12 Top 10 research directions for publications of metabolites of actinobacteria in WOS and CNKI

排名 Rank	WOS					CNKI				
	研究方向 Research direction	发文量 (篇) Number of papers	发文百分比 Percentage (%)	H 指数 H-index	H 指数 排名 Rank of H-index	研究方向 Research direction	发文量 (篇) Number of papers	发文 百分比 Percentage (%)	H 指数 H-index	H 指数 排名 Rank of H-index
1	微生物学 Microbiology	8 273	26.02	171	1	生物学 Biology	1 353	25.95	38	1
2	生物技术应用 微生物学 Biotechnology applied microbiology	7 880	24.79	148	3	植物保护 Plant protection	930	25.48	35	2
3	生物化学分子 生物学 Biochemistry molecular biology	5 571	17.52	164	2	农业基础科学 Agricultural basic science	515	17.93	32	3
4	化学 Chemistry	4 135	13.01	123	5	药学 Pharmacy	380	13.07	17	9
5	药理药学 Pharmacology pharmacy	3 588	11.29	120	6	农艺学 Agronomy	334	11.50	27	4
6	免疫学 Immunology	1 908	6.00	96	7	园艺 Horticulture	276	6.18	24	5
7	环境科学生态学 Environmental sciences ecology	1 771	5.57	91	8	中药学 Chinese materia medica	271	5.21	21	7
8	农业 Agriculture	1 643	5.17	90	9	环境科学与资源 利用 Environmental science and resource utilization	187	4.94	24	5
9	科学技术其他 话题 Sciences technology other topics	1 526	4.80	130	4	农作物 Sciences technology other topics	185	4.70	21	8
10	植物科学 Plant sciences	1 321	4.16	76	10	一般化学工业 General chemical industry	178	3.98	13	10

1 353 篇, H 指数 38), 植物保护的发文量和 H 指数均排名第二(发文量 930 篇, H 指数 35), 农业基础科学的发文量和 H 指数均排名第三(发文量 515 篇, H 指数 32)。这说明生物学是中国放线菌代谢产物领域的主要研究方向, 植

物保护和农业基础科学是中国在放线菌代谢产物领域的次要研究方向(表 12)。

3.9 研究热点分析

关键词是一篇文章的核心概括, 高频率的关键词可以反映放线菌天然产物领域的研究热

点^[43]。利用 VOSviewer 软件中关键词分析功能, 将 WOS 数据导入 VOSviewer 软件, 将最低共现次数设置为 100 次, 得到符合条件的 634 个关键词, 其密度视图如图 4A 所示, 可以看出全球放线菌代谢产物研究热点是生物合成, 次热点包括大肠杆菌、链霉菌和产物的鉴别等, 关键词具体出现频次如表 13 所示, 其中出现频次最高的关键词是 biosynthesis (生物合成, 频次 2 606), 其次是 *Escherichia coli* (大肠杆菌, 频次 2 390) 和 *Streptomyces* (链霉菌, 频次 2 275)。

CNKI 数据最低共现次数设置为 100 次, 得到符合条件的 17 个关键词, 其密度视图如图 4B 所示, 可以看出中国放线菌代谢产物领域的研究热点是放线菌, 次热点包括海洋放线菌和次级代谢产物等, 关键词具体出现频次如表 13 所示, 其中出现频次最高的关键词是“放线菌”(actinomycetes, 频次 843), 其次是“海洋放线菌”(marine actinomycetes, 频次 276) 和“次级代谢产物”(secondary metabolites, 频次 244)。

3.10 研究趋势分析

突现词分析是通过考察关键词的时间分布, 从中探测出频率变化率高、增长速度快的突现词, 进而分析学科的前沿领域和发展趋势^[43], 聚类时间线图分析是将相关词汇进行归纳, 按照时间发展排列分布, 反映科学发展趋势。将两者数据结合, 综合判定放线菌代谢产物研究趋势。

3.10.1 关键词突现分析

将 WOS、CNKI 数据导入 CiteSpace 软件, 执行词频探测技术分析得到放线菌代谢产物突现关键词, 可以反映该领域某一时间段新兴的研究热点^[43]。利用 CiteSpace 可视化软件将 WOS 关键词的连续突现时间设置为 5 年, 时间切片为 1 年, 得到 112 年间 24 380 个突现词,

按照突现时间和突现强度提取其中 20 个强突现词进行分析。结果显示该领域的发展主要分为两个阶段: 1990–2000 年, 主要是对放线菌基因的认识, 特别是对“克隆(cloning)”“核苷酸序列(nucleotide sequence)”的研究; 2000–2022 年, 是对放线菌在肠道中作用的探索, 特别是对“肠道微生物群”的研究(表 14)。

将 CNKI 关键词的连续突现时间设置为 5 年, 时间切片为 1 年, 对 74 年间 13 个突现词进行分析(CNKI 数据量少, 分析结果只有 13 个突现词)。结果显示该领域的发展主要分为 2 个阶段: 1959–2000 年, 主要是集中在抗生素的发现与应用及其相关领域, 特别是对“抗菌素”的研究; 2000–2022 年, 对于该领域的研究更加宽泛, 对其物种或产物多样性与产物类别有了更多的关注, 特别是对“多样性”和“天然产物”的研究(表 15)。

3.10.2 关键词聚类分析

利用 loglikelihood ratio test (LLR) 算法, 对关键词进行聚类分析并按照时间线进行排列^[44]。图中圆点代表引文年环(tree ring history), 环大小反映该论文共被引用次数^[43]。线条反映不同聚类之间知识关联度, 越接近黄色就离现在的时间越近。CiteSpace 依据 WOS 数据主要梳理了 18 个显著聚类(图 5)发现其研究趋势, 2000 年以前主要研究内容多与抗生素相关, 尤其多与是聚酮类化合物相关(聚酮类化合物的天然宿主多为放线菌属), 聚酮类化合物的发展得益于红霉素(erythromycin)的发现, 红霉素是最早被发现的聚酮类抗生素之一, 是糖多孢菌(*Saccharopolyspora*)发酵液中提取出的一种次级产物^[45]。2000 年以后除保持对放线菌天然产物的研究外, 对放线菌群落结构也开始了研究。WOS 文献共被引聚类时间演变顺序如表 16 所示。

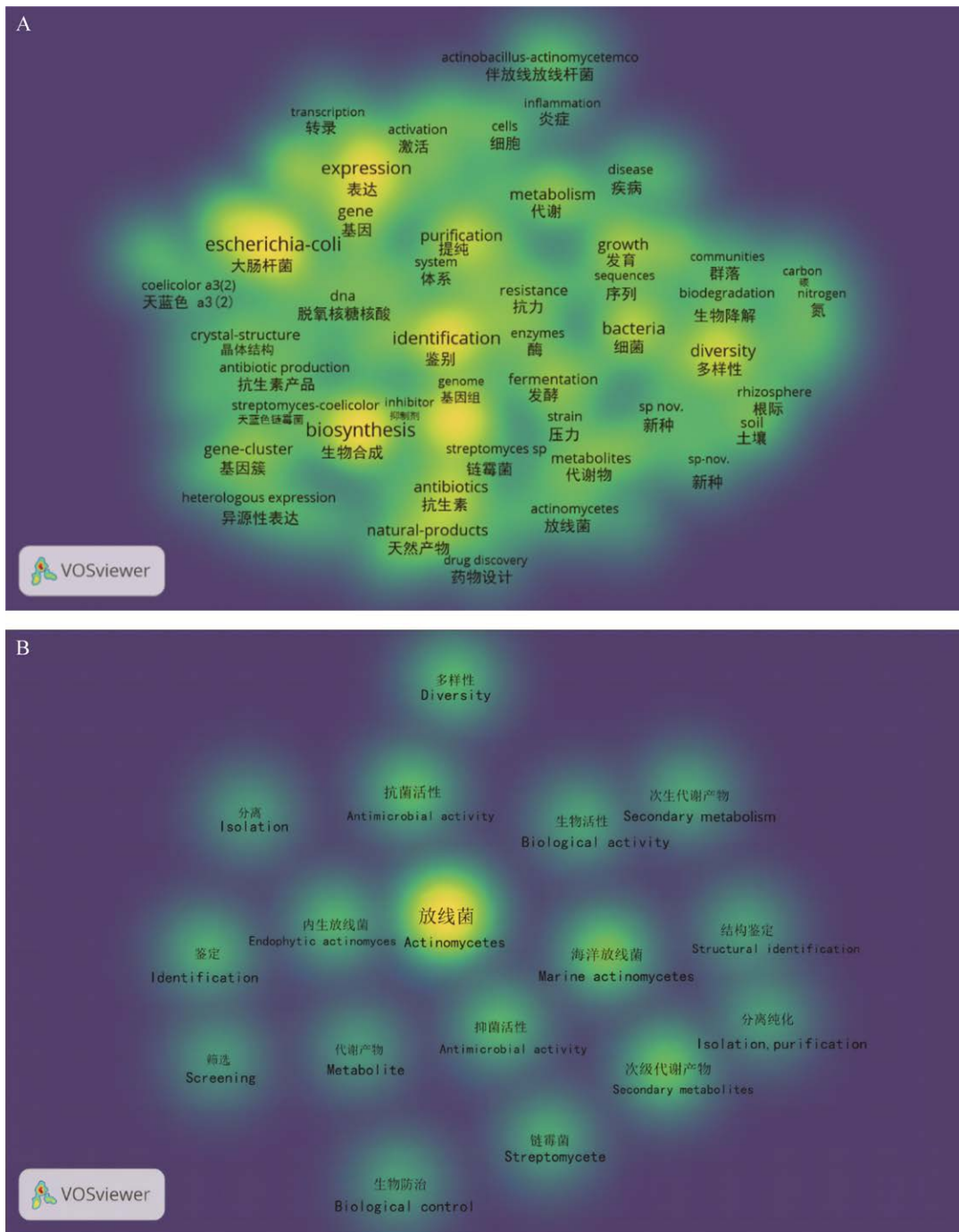


图 4 WOS (A)和 NCKI (B)中关键词密度视图 密度视图根据每个密度区域节点的数目、彼此间的相互联系的紧密程度, 颜色的深浅不同得以匹配, 颜色越深表示密度越高, 也说明该密度区域是研究的热点

Figure 4 Density visualization of keywords in WOS (A) and CNKI (B). Density visualization according to the number of nodes in each density area and the closeness of each other, the different color shades can be matched. The darker the color, the higher the density, which also indicates that the density area is the hot spot of research.

表 13 WOS 和 CNKI 中排名前 10 的高频关键词

Table 13 Top 10 keywords with high occurrences in WOS and CNKI

序号 Order	WOS		CNKI	
	关键词 Keyword	频次 Occurrences	关键词 Keyword	频次 Occurrences
1	生物合成 Biosynthesis	2 606	放线菌 <i>Actinomycetes</i>	843
2	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	2 390	海洋放线菌 Marine actinomycetes	276
3	链霉菌 <i>Streptomyces</i>	2 275	次级代谢产物 Secondary metabolites	244
4	鉴别 Identification	2 158	抗菌活性 Antibacterial activity	206
5	表达 Expression	2 056	多样性 Diversity	188
6	多样性 Diversity	1 537	抑菌活性 Antimicrobial activity	185
7	细菌 Bacteria	1 332	内生放线菌 Endophytic actinomycetes	177
8	提纯 Purification	1 282	鉴定 Identification	156
9	抗生素 Antibiotics	1 250	链霉菌 <i>Streptomyces</i>	144
10	基因 Gene	1 124	次生代谢产物 Secondary metabolism	135

CiteSpace 依据 CNKI 数据主要梳理了其中的 8 个显著聚类(图 6), 发现其研究趋势主要是: 2000 年以前主要是对放线菌生物合成方法进行研究且对其药理学活性进行检测; 2000 年以后主要是对放线菌属挖掘, 对其代谢产物进行结构鉴定以及药理活性检测, CNKI 文献共被引聚类时间演变顺序如表 17 所示。

4 结论

本文利用 Web of Science 数据库中的 Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) 数据库和中国知网(CNKI)数据库对放线菌代谢产物的相关文献进行检索, 对发文数量、发文国家、发文机构、发文期刊、发文出版社、发文作者和研究方向进行归纳、分析, 并利用 VOSviewer、CiteSpace 分析工具对 WOS、CNKI 来源关键词

进行研究热点和发展趋势分析。研究结果表明: (1) WOS 结果显示, 放线菌代谢产物研究领域全球影响力最大的国家是美国, 影响力最大的机构是美国加利福尼亚大学, 影响力最大的期刊是美国 *Applied and Environmental Microbiology*, 影响力最大的出版社是 Elsevier, 影响力最大的作者是来自英国约翰英纳斯研究中心微生物学部的 Mervyn J Bibb 教授。被引频次最高的文章是发表于 *Journal of Nature Products* (天然产物杂志) 的 Natural products as sources of new drugs over the last 25 years。全球领域放线菌代谢产物的主要研究方向是“微生物学”, 研究热点是“生物合成”。研究趋势是从 2000 年前对基因和抗生素相关的研究, 转变为 2000 年后对肠道微生物群和天然产物发现相关的研究。(2) CNKI 结果显示, 放线菌代谢产物研究领域中国影响力

表 14 WOS 中放线菌代谢产物关键词突现强度图

Table 14 Keywords with the strongest citation bursts in metabolites of actinobacteria in WOS

序号 Order	关键词 Keyword	出现时间 Begin burst time	结束时间 End burst time	突现强度 Burst strength	关键词突现图 The figure of keywords strongest in citation burst
1	细胞 Cell	1990	2001	69.93	
2	脱氧核糖核酸 DNA	1990	2006	52.48	
3	核苷酸序列 Nucleotide sequence	1991	2003	233.25	
4	克隆 Cloning	1991	2006	209.48	
5	表达 Expression	1991	2003	122.07	
6	信使核糖核酸 Messenger RNA	1991	2006	116.34	
7	肿瘤坏死因子 Tumor necrosis factor	1991	2002	85.65	
8	蛋白 Protein	1991	2004	83.31	
9	提纯 Purification	1991	2005	79.99	
10	带小棒链霉菌 <i>Streptomyces clavuligerus</i>	1991	2010	57.84	
11	蛋白激酶 C Protein kinase C	1991	2000	55.61	
12	分子克隆 Molecular cloning	1991	2008	54.43	
13	糖多孢红霉菌 <i>Saccharopolyspra erythraea</i>	1993	2008	90.12	
14	天蓝色链霉菌 A3(2) <i>Streptomyces coelicolor</i> A3(2)	1993	2010	51.07	
15	伴放线放线杆菌 <i>Actinobacillus actinomycetemcomitan</i>	1996	2011	76.51	
16	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	1997	2007	133.42	
17	肠道微生物群 Gut microbiota	2019	2022	135.01	
18	多样性 Diversity	2019	2022	95.90	
19	微生物群落 Microbial community	2019	2022	85.99	
20	细菌群落 Bacterial community	2019	2022	81.64	

表 15 CNKI 中放线菌代谢产物关键词突现强度图

Table 15 Keywords with the strongest citation bursts in metabolites of actinobacteria in CNKI

序号	关键词	出现时间	结束时间	突现强度	关键词突现图
Order	Keywords	Begin burst time	End burst time	Burst strength	The figure of keywords strongest in citation burst
1	抗菌素 Bacteriophage	1959	2001	5.75	
2	微生物 Microorganism	1947	2007	5.11	
3	抗生素 Antibiotic	1981	2005	6.6	
4	生物防治 Biological control	2003	2009	7.02	
5	发酵产物 Fermentation products	2004	2009	5.17	
6	发酵 Fermentation	2005	2010	6.76	
7	发酵条件 Fermentation condition	2005	2008	4.73	
8	菌种鉴定 Strain identification	2007	2011	6.60	
9	稳定性 Stability	2009	2015	6.54	
10	多样性 Diversity	2014	2019	10.94	
11	分离鉴定 Isolation, identification	2014	2022	5.53	
12	天然产物 Natural products	2016	2022	10.15	
13	红树林 Mangrove forests	1017	2018	5.30	

最大的机构是西北农林科技大学。影响力最大的期刊是《微生物学通报》，影响力最大的作者是云南大学生命科学学院徐丽华教授，被引频次最高的文章是发表于《有机化学》的“2010–2013 之海洋微生物新天然产物”。放线菌代谢产物领域的主要研究方向是“生物学”，研

究热点是“放线菌”。研究趋势是从 2000 年前对抗生素和生物合成相关的研究，转变为 2000 年后对多样性和鉴定相关的研究。

综上所述，目前全球放线菌代谢产物研究正在快速发展。美国在该领域处于全球领先地位，其发文数量、*H* 指数均排名世界首位，发

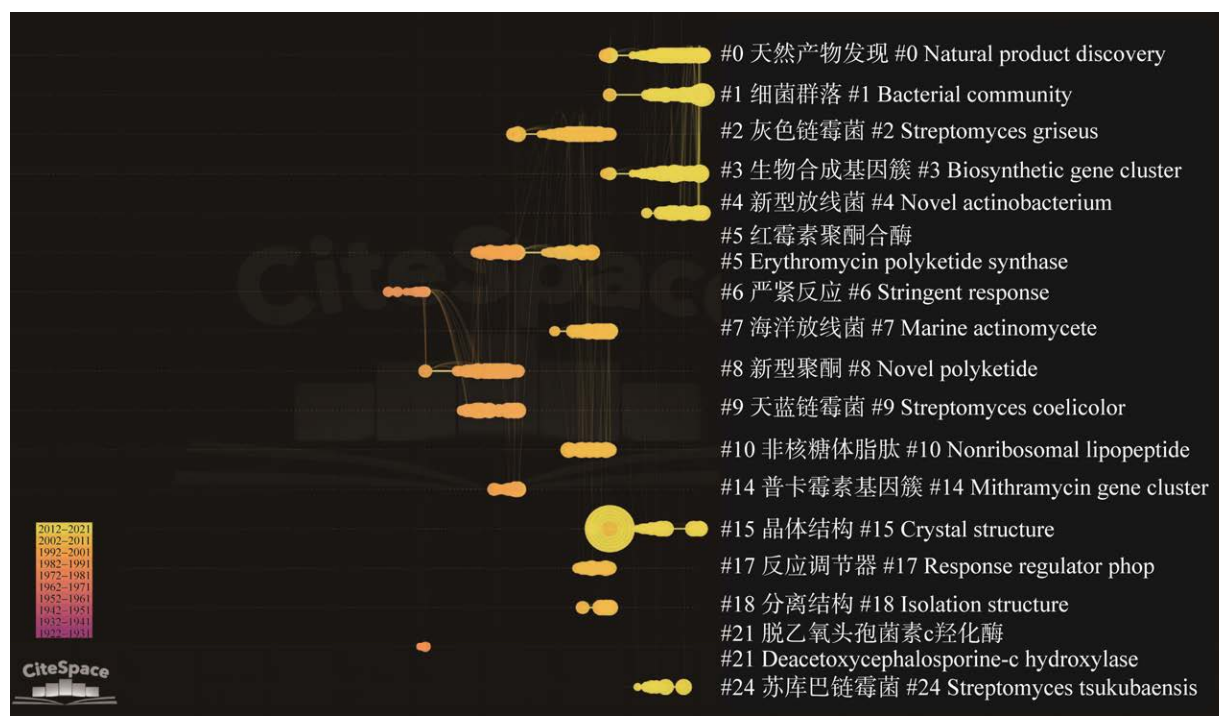


图 5 WOS 中放线菌代谢产物文献共被引聚类图

Figure 5 Co-cited cluster of literatures on metabolites of actinobacteria in WOS.

表 16 WOS 中放线菌代谢产物文献共被引聚类时间演变

Table 16 Time evolution of co-cited cluster of literatures on metabolites of actinobacteria in WOS

时间段 Period	共被引聚类词汇 Co-cited cluster word
1910-1919	无 None
1920-1929	无 None
1930-1939	无 None
1940-1949	无 None
1950-1959	无 None
1960-1969	#6 严谨反应 #6 Stringent response
1970-1979	#6 严谨反应, #8 新型聚酮, #21 脱乙酰头孢菌素 c 羟化酶 #6 Stringent response, #8 Novel polyketide, #21 Deacetoxycephalosporine-c hydroxylase
1980-1989	#5 红霉素聚酮合酶, #8 新型聚酮, #9 天蓝链霉菌 #5 Erythromycin polyketide synthase, #8 Novel polyketide, #9 Streptomyces coelicolor
1990-1999	#5 红霉素聚酮合酶, #8 新型聚酮, #9 天蓝链霉菌, #14 普卡霉素基因簇 #5 Erythromycin polyketide synthase, #8 Novel polyketide, #9 Streptomyces coelicolor, #14 Mithramycin gene cluster
2000-2009	#2 灰色链霉菌, #5 红霉素聚酮合酶, #7 海洋放线菌, #10 非核糖体脂肽, #17 反应调节器, #18 分离结构 #2 Streptomyces griseus, #5 Erythromycin polyketide synthase, #7 Marine actinomycete, #10 Nonribosomal lipopeptide, #17 Response regulator phop, #18 Isolation structure
2010-2019	#0 天然产物发现, #1 细菌群落, #3 生物合成基因簇 #0 Natural product discovery, #1 Bacterial community, #3 Biosynthetic gene cluster
2020-2022	#0 天然产物发现, #1 细菌群落, #3 生物合成基因簇, #4 新型放线菌, #15 晶体结构, #24 苏库巴链霉菌 #0 Natural product discovery, #1 Bacterial community, #3 Biosynthetic gene cluster, #4 Novel actinobacterium, #15 Crystal structure, #24 Streptomyces tsukubaensis

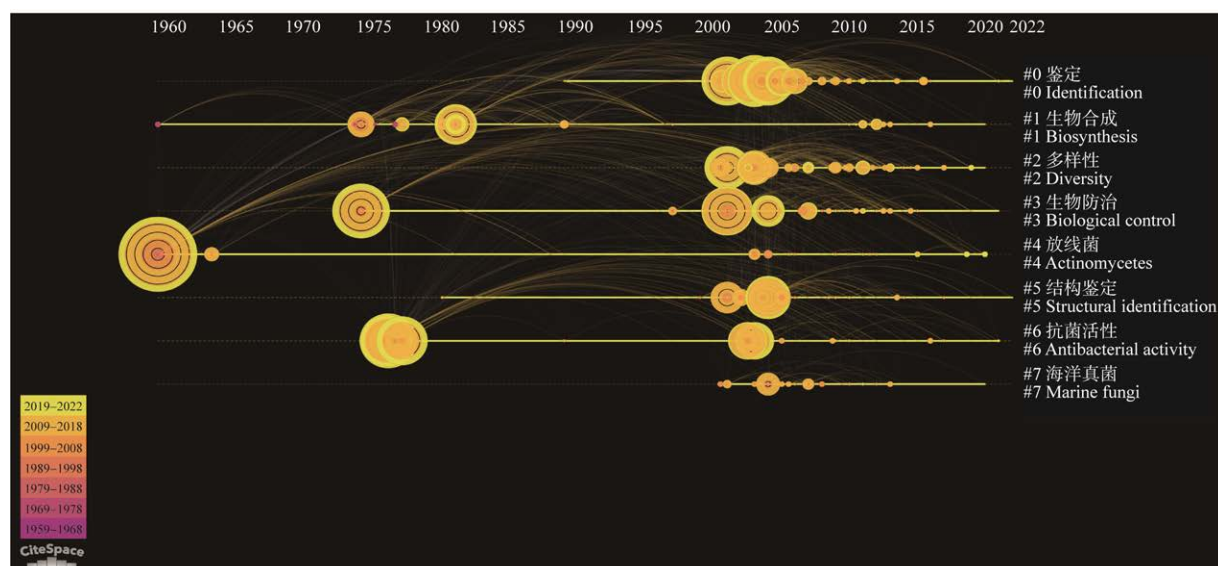


图 6 CNKI 中放线菌代谢产物文献共被引聚类图

Figure 6 Co-cited cluster of literatures on metabolites of actinobacteria in CNKI.

表 17 CNKI 中放线菌代谢产物文献共被引聚类时间演变

Table 17 Time evolution of co-cited cluster of literatures on metabolites of actinobacteria in CNKI

时间段	共被引聚类词汇
Period	Co-cited cluster word
1960-1969	#4 放线菌 #4 Actinomycetes
1970-1979	#1 生物合成, #3 生物防治, #6 抗菌活性 #1 Biosynthesis, #3 Biological control, #6 Antibacterial activity
1980-1989	#1 生物合成 #1 Biosynthesis
1990-1999	无 None
2000-2009	#0 鉴定, #2 多样性, #3 生物防治, #5 结构鉴定, #6 抗菌活性、#7 海洋真菌 #0 Identification, #2 Diversity, #3 Biological control, #5 Structural identification, #6 Antibacterial activity, #7 Marine fungi
2010-2019	#0 鉴定, #1 生物合成, #2 多样性, #3 生物防治, #4 放线菌, #5 结构鉴定, #6 抗菌活性, #7 海洋真菌 #0 Identification, #1 Biosynthesis, #2 Diversity, #3 Biological control, #4 Actinomycetes, #5 Structural identification, #6 Antibacterial activity, #7 Marine fungi
2020-2022	无 None

文机构、发文期刊和发文出版社在世界范围内具有较大影响力。中国发文数量排名世界首位, H 指数全球排名第五, 相关发文机构和专家、学者在国内外具有一定影响力。全球放线菌代谢产物领域的研究热点是生物合成, 研究趋势是从基因和抗生素相关的研究转向了肠道微生物群和天然产物发现相关的研究。未来中国在放线菌代谢产物研究领域应加强高质量文章发

表和期刊建设、出版社建设, 加强肠道微生物群和天然产物发现相关的研究, 以带动在该领域研究实力的整体提升。

REFERENCES

- [1] 李文均, 职晓阳, 唐蜀昆. 我国放线菌系统学研究历史、现状及未来发展趋势[J]. 微生物学通报, 2013, 40(10): 1860-1873.
LI WJ, ZHI XY, TANG SK. Actinobacterial

- systematics in China: past, present and future[J]. *Microbiology China*, 2013, 40(10): 1860-1873 (in Chinese).
- [2] 李文均, 焦建宇. 放线菌分类地位的变迁及其系统学研究最新进展[J]. *微生物学杂志*, 2020, 40(1): 1-14.
LI WJ, JIAO JY. The change of taxonomic status of Actinobacteria and the latest progress in its systematics[J]. *Journal of Microbiology*, 2020, 40(1): 1-14 (in Chinese).
- [3] JOSE PA, MAHARSHI A, JHA B. Actinobacteria in natural products research: progress and prospects[J]. *Microbiological Research*, 2021, 246: 126708.
- [4] HASSAN SSU, ANJUM K, ABBAS SQ, AKHTER N, SHAGUFTA BI, ALI SHAH SA, TASNEEM U. Emerging biopharmaceuticals from marine Actinobacteria[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2017, 49: 34-47.
- [5] DEMAINE AL, 吴剑波. 放线菌最近为我们做了些什么?[J]. *国外医药(抗生素分册)*, 1989, 10(5): 319-323.
DEMAINE AL, WU JB. What have Actinobacteria done for us recently?[J]. *World Notes on Antibiotics*, 1989, 10(5): 319-323 (in Chinese).
- [6] BHAKYASHREE K, KANNABIRAN K. Pharmaceutical and biotechnological importance of actinobacterial products[J]. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 2020, 54(4): 858-864.
- [7] 尚坤, 阎瑾逸, 高君梅, 王瑾, 李思颖, 闫祥祥, 黄小玉, 刘晨, 岳昌武. 放线菌来源活性天然产物发现研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1186.Q.20220922.1128.002.html>.
SHANG K, YAN JY, GAO JM, WANG J, LI SY, YAN XX, HUANG XY, LIU C, YUE CW. Advances in the discovery of actinomycetes originated active natural products[J]. *Journal of Microbiology*, 2022. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1186.Q.20220922.1128.002.html> (in Chinese).
- [8] 江婷, 蒲洪, 段燕文, 颜晓晖, 黄勇. 深海、沙漠、火山、极地来源链霉菌新天然产物(2009–2020)[J]. *有机化学*, 2021, 41(5): 1804-1820.
JIANG T, PU H, DUAN YW, YAN XH, HUANG Y. New natural products of *Streptomyces* sourced from deep-sea, desert, volcanic, and polar regions from 2009 to 2020[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2021, 41(5): 1804-1820 (in Chinese).
- [9] 代芳平, 李师翁. 链霉菌次级代谢物及其应用研究进展[J]. *生物技术通报*, 2014(3): 30-35.
DAI FP, LI SW. Progress on the secondary metabolites and applications of *Streptomyces*[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2014(3): 30-35 (in Chinese).
- [10] 李文均, 张永光. 拟诺卡氏菌属放线菌研究进展[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(5): 1123-1135.
LI WJ, ZHANG YG. Advances in studies on the genus *Nocardiopsis*[J]. *Microbiology China*, 2016, 43(5): 1123-1135 (in Chinese).
- [11] 陶巧巧, 蔡晓凤. 诺卡菌来源活性次级代谢产物[J]. *中国抗生素杂志*, 2020, 45(9): 833-849.
TAO QQ, CAI XF. Research advances on the bioactive secondary metabolites from *Nocardia* spp.[J]. *Chinese Journal of Antibiotics*, 2020, 45(9): 833-849 (in Chinese).
- [12] 张娅, 曹成亮, 李荣鹏, 蒋继宏. 糖丝菌属放线菌研究进展[J]. *微生物学报*, 2022, 62(5): 1600-1612.
ZHANG Y, CAO CL, LI RP, JIANG JH. Recent advance on the genus *Saccharothrix*[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(5): 1600-1612 (in Chinese).
- [13] 程元荣, 郑卫. 小单孢菌及其产生的次级生物活性代谢产物[J]. *中国抗生素杂志*, 2006, 31(6): 321-327.
CHENG YR, ZHENG W. *Micromonospora* spp. and their secondary bioactive metabolites[J]. *Chinese Journal of Antibiotics*, 2006, 31(6): 321-327 (in Chinese).
- [14] 刘效稳. 东方拟无枝酸菌 HCCB10007 代谢产物的研究[D]. 沈阳: 沈阳药科大学硕士学位论文, 2009.
LIU XW. Study on the metabolites of *Amycolatopsis orientalis* HCCB10007[D]. Shenyang: Master's Thesis of Shenyang Pharmaceutical University, 2009 (in Chinese).
- [15] 陈国娟, 张春红, 刘长江. 谷氨酰胺转氨酶高产菌株的选育[J]. *食品科技*, 2006, 31(2): 15-17.
CHEN GJ, ZHANG CH, LIU CJ. Screening of microbe strain for high-production of microbial transglutaminase[J]. *Food Science and Technology*, 2006, 31(2): 15-17 (in Chinese).
- [16] 何晶晶, 黄训端, 宋平, 郭金华, 陈惠鹏, 曹诚, 张部昌. *bldD* 基因过量表达对红色糖多孢菌红霉素产量及孢子形成的影响[J]. *军事医学科学院院刊*, 2010, 34(3): 251-254.
HE JJ, HUANG XD, SONG P, GUO JH, CHEN HP, CAO C, ZHANG BC. Effect of *bldD* gene overexpression on erythromycin output and spore formation of *Saccharopolyspora erythraea*[J]. *Military*

- Medical Sciences, 2010, 34(3): 251-254 (in Chinese).
- [17] 彭仁, 汪金莲, 刘家龙, 邱业先, 卢向阳, 罗泽民. 稻田 *Dactylosporangium aurantiacum* 菌中脲酶的纯化与性质研究[J]. 江西农业大学学报(自然科学版), 2002, 24(5): 595-598.
- PENG R, WANG JL, LIU JL, QIU YX, LU XY, LUO ZM. Studies on the purification and characteristics of urease in *Dactylosporangium aurantiacum* in paddy fields[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2002, 24(5): 595-598 (in Chinese).
- [18] 王远山, 牛鑫森, 郑裕国. 游动放线菌原生质体诱变选育阿卡波糖高产菌株[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(5): 37-43.
- WANG YS, NIU XM, ZHENG YG. Protoplast mutagenesis for improving acarbose production of *Actinoplanes*[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(5): 37-43 (in Chinese).
- [19] 赵子刚, 夏黎明. 马杜霉素发酵法生产工艺的研究[J]. 中国兽药杂志, 2004, 38(1): 47-50.
- ZHAO ZG, XIA LM. Studies on the fermentation conditions of maduramicin by *Actinomadura yumanense* sp. ZU-M3 strain[J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2004, 38(1): 47-50 (in Chinese).
- [20] GONZALEZ-NAVA JB, ALONSO-CARMONA S, MANZANARES-LEAL GL, SANDOVAL-TRUJILLO H, DURAN NR. Current techniques for the search for natural products in actinobacteria[J]. Records of Natural Products, 2022(4): 274-292.
- [21] 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 汪钰欣, 牛世全. 放线菌及其代谢产物研究进展: 基于 CiteSpace 可视化分析[J]. 微生物学报, 2022, 62(10): 3825-3843.
- YANG Y, LI HL, MA KL, WANG YX, NIU SQ. Actinomycetes and their metabolites: visual analysis based on CiteSpace[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022, 62(10): 3825-3843 (in Chinese).
- [22] 朱丹, 王敬敬, 赵思崎, 杨榕, 徐松, 黄志勇. 关于秸秆微生物降解的文献计量分析[J]. 微生物学通报, 2020, 47(8): 2550-2559.
- ZHU D, WANG JJ, ZHAO SQ, YANG R, XU S, HUANG ZY. Bibliometric analysis of straw degradation by microorganisms[J]. Microbiology China, 2020, 47(8): 2550-2559 (in Chinese).
- [23] 王钰雯, 李杰, 李晓宁, 王修齐, 刘香兰, 王保秀, 杨青松. 基于文献计量的国内外植物腺毛研究态势分析[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//53.1192.N.20230223.1147.004.html>
- WANG YW, LI J, LI XN, WANG XQ, LIU XL, WANG BX, YANG QS. Research situation analysis of plant glandular trichomes based on bibliometrics[J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//53.1192.N.20230223.1147.004.html> (in Chinese).
- [24] 谭明亮, 蒋静. 2010-2021 年国内文本挖掘的文献计量分析[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(1): 26-30.
- TAN ML, JIANG J. Bibliometric analysis of domestic text mining from 2010 to 2021[J]. Digital Technology and Application, 2023, 41(1): 26-30 (in Chinese).
- [25] 吴爱芝, 肖珑, 张春红, 刘妹. 基于文献计量的高校学科竞争力评估方法与体系[J]. 大学图书馆学报, 2018, 36(1): 62-67, 26.
- WU AZ, XIAO L, ZHANG CH, LIU S. Evaluation methods and system of university discipline competitiveness based on bibliometrics[J]. Journal of Academic Libraries, 2018, 36(1): 62-67, 26 (in Chinese).
- [26] ZHANG LL, LING J, LIN MW. Artificial intelligence in renewable energy: a comprehensive bibliometric analysis[J]. Energy Reports, 2022, 8: 14072-14088.
- [27] 杜文龙, 谢珍, 陈怡君. 基于 VOSviewer 软件的国际区块链知识图谱研究[J]. 大学图书馆学报, 2021, 39(1): 102-106.
- DU WL, XIE Z, CHEN YJ. Research on knowledge map of international blockchain based on VOSviewer software[J]. Journal of Academic Library and Information Science, 2021, 39(1): 102-106 (in Chinese).
- [28] 刘佳琳, 李喆. 多模态学习的研究热点、动态前沿与趋势分析——基于 CiteSpace 软件的可视化分析[J]. 卫生职业教育, 2022, 40(19): 125-129.
- LIU JL, LI Z. Research hotspot, dynamic frontier and trend analysis of multimodal learning—visual analysis based on CiteSpace software[J]. Health Vocational Education, 2022, 40(19): 125-129 (in Chinese).
- [29] 安传艳, 李同昇, 翟洲燕, 付强. 1992-2016 年中国乡村旅游研究特征与趋势——基于 CiteSpace 知识图谱分析[J]. 地理科学进展, 2018, 37(9): 1186-1200.
- AN CY, LI TS, ZHAI ZY, FU Q. Characteristics and prospects of Chinese rural tourism research, 1992-2016: an analysis based on CiteSpace maps[J]. Progress in Geography, 2018, 37(9): 1186-1200 (in Chinese).
- [30] 朱惠, 邓三鸿, 杨建林. 我国图书情报学领域博士生导师 H 指数分析[J]. 图书与情报, 2013(5): 57-66.
- ZHU H, DENG SH, YANG JL. H-index analysis of PhD supervisors in library and information science fields[J]. Library and Information, 2013, 5: 57-66 (in

- Chinese).
- [31] WAKSMAN SA. Studies in the metabolism of pathogenic actinomycetes (*Streptothrices*). I[J]. The Journal of Infectious Diseases, 1918, 23(6): 547-554.
- [32] M.И. 納希莫夫斯卡娅, H.H. 奥斯特洛夫卡娅, Л.И. 雅尔馬林格, Л.П. 伊凡尼茨卡娅, 黎宁, 翁稣穎. 在表面培养的条件下提高放线菌抗菌素活力的简单方法[J]. 生物学教学, 1959, 1959(5): 22-23.
- NASHIMOVSKAYA MH, OSTROV KAJI HH, JARMARINGER ЛИ, IVNITSKAYA ЛП, LI N, WENG SY. Simple method to improve the viability of actinobacteria antimicrobials under conditions of surface culture[J]. Biology teaching, 1959, 1959(5): 22-23 (in Chinese).
- [33] TAO H, ZHANG YC, DENG ZX, LIU TG. Strategies for enhancing the yield of the potent insecticide spinosad in actinomycetes[J]. Biotechnology Journal, 2019, 14(1): 1700769.
- [34] WANG T, BAI LQ, ZHU DQ, LEI X, LIU G, DENG ZX, YOU DL. Enhancing macrolide production in *Streptomyces* by coexpressing three heterologous genes[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2012, 50(1): 5-9.
- [35] TAKANO E, NIHIRA T, HARA Y, JONES JJ, GERSHATER CJL, YAMADA Y, BIBB M. Purification and structural determination of SCB1, a γ -butyrolactone that elicits antibiotic production in *Streptomyces coelicolor* A3(2)[J]. Journal of Biological Chemistry, 2000, 275(15): 11010-11016.
- [36] GOMEZ-ESCRIBANO JP, SONG LJ, FOX DJ, YEO V, BIBB MJ, CHALLIS GL. Structure and biosynthesis of the unusual polyketide alkaloid coelimycin P1, a metabolic product of the *cpk* gene cluster of *Streptomyces coelicolor* M145[J]. Chemical Science, 2012, 3(9): 2716-2720.
- [37] QIN S, LI J, CHEN HH, ZHAO GZ, ZHU WY, JIANG CL, XU LH, LI WJ. Isolation, diversity, and antimicrobial activity of rare actinobacteria from medicinal plants of tropical rain forests in Xishuangbanna, China[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, 75(19): 6176-6186.
- [38] HUANG HB, YAO YL, HE ZX, YANG TT, MA JY, TIAN XP, LI YY, HUANG CG, CHEN XP, LI WJ, ZHANG S, ZHANG CS, JU JH. Antimalarial β -carboline and indolactam alkaloids from *Marinactinospora thermotolerans*, a deep sea isolate[J]. Journal of Natural Products, 2011, 74(10): 2122-2127.
- [39] 田守征, 刘凯, 徐丽华, 唐蜀昆, 赵立兴. 嗜盐放线菌资源及次生代谢产物研究进展[J]. 微生物学通报, 2014, 41(9): 1882-1890.
- TIAN SZ, LIU K, XU LH, TANG SK, ZHAO LX. Advances in bioresources and secondary metabolites of halophilic actinobacteria[J]. Microbiology China, 2014, 41(9): 1882-1890 (in Chinese).
- [40] NEWMAN DJ, CRAGG GM. Natural products as sources of new drugs over the last 25 years[J]. Journal of Natural Products, 2007, 70: 461-477.
- [41] BENTLEY SD, CHATER KF, CERDEÑO-TÁRRAGA AM, CHALLIS GL, THOMSON NR, JAMES KD, HARRIS DE, QUAIL MA, KIESER H, HARPER D, BATEMAN A, BROWN S, CHANDRA G, CHEN CW, COLLINS M, CRONIN A, FRASER A, GOBLE A, HIDALGO J, HORNSBY T, et al. Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3(2)[J]. Nature, 2002, 417(6885): 141-147.
- [42] 赵成英, 朱统汉, 朱伟明. 2010-2013 之海洋微生物新天然产物[J]. 有机化学, 2013, 33(6): 1195-1234.
- ZHAO CY, ZHU TH, ZHU W. New marine natural products of microbial origin from 2010 to 2013[J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2013, 33(6): 1195-1234 (in Chinese).
- [43] 王晴, 杨宗帅, 尹立普, 宋昕, 魏昌龙, 李燕丽, 翟伟. 有机污染土壤和地下水生物修复研究热点和趋势: 基于 Web of Science 数据库的文献计量学分析[J]. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3549-3564.
- WANG Q, YANG ZS, YIN LP, SONG X, WEI CL, LI YL, ZHAI W. Bibliometric analysis on bioremediation of organic contaminated soil and groundwater based on Web of Science database[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(10): 3549-3564 (in Chinese).
- [44] 张宇轩, 李勃深, 范容晖, 李晓琳, 李茂星. 基于 CiteSpace 知识图谱的西红花研究现状与趋势分析[J]. 中国中药杂志, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2272.R.20230227.1531.004.html>.
- ZHANG YX, LI BS, FAN RH, LI XL, LI MX. CiteSpace knowledge map of research status and trends of Croci Stigma[J]. China Journal of Chinese Material Medica, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2272.R.20230227.1531.004.html> (in Chinese).
- [45] 庞子萱, 吴季恒, 严豪, 王志远, 李业, 白仲虎. 聚酮类化合物研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 316-326.
- PANG ZX, WU JH, YAN H, WANG ZY, LI Y, BAI ZH. Research progress of polyketides[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 316-326 (in Chinese).